端抽运 Yb³⁺:YVO4 激光准三能级理论模型研究*

夏忠朝 羊富贵† 乔亮

(福建江夏学院,福州 350108)

(2012年12月10日收到;2013年2月25日收到修改稿)

立足于 Yb 离子能级结构、谐振腔增益损耗和布居数分配情况,利用爱因斯坦辐射理论和速率方程理论,建立 了适合 Yb³⁺ 离子激光的准三能级理论模型. 该模型引入有效腔长增益贡献因子对腔内光强进行了从头计算,获 得了阈值方程. 利用此模型与 Yb 激光的实验结果相比较,发现有效腔长对增益的贡献可以改变腔内损耗和粒子 数反转的概率,也继而影响激光阈值和输出功率效率. 应用于 LD 端抽运 Yb³⁺:YVO₄ 激光实验中,在 971 nm LD 抽运,有效晶体长度 L = 1 nm,输出镜透过率对激光波长 1016 nm 为 1%条件下,获得阈值为 1.1 W;有效晶体长度 L = 2 nm,输出镜透过率为 10%条件下,阈值获得为 3.9 W.

关键词: Yb³⁺:YVO₄, 准三能级模型, 有效腔长增益贡献因子
 PACS: 42.55.Xi, 32.30.Jc, 65.40.De
 DOI: 10.7498/aps.62.114206

1引言

在固体激光中,稀土离子掺杂的激光占据绝大 多数,其中,利用 Nd³⁺离子掺杂产生 1064 nm 和倍 频 532 nm 绿光已经获得了成熟广泛的应用,基于 该波长的四能级理论模型也获得了比较成熟的研 究和应用^[1-4].

Yb³⁺ 是另外一种极有前途的稀土离子, 拥有 类似 Nd³⁺ 的许多优点, 并且其简单的二能级结 构²F_{7/2} 和²F_{5/2} 使得 Yb 离子没有激发态吸收, 没有 常规上转换, 没有浓度猝灭等独特的优势^[5]. Yb³⁺ 的吸收峰位于 970—980 nm, 可以利用半导体激光 LD 进行抽运, 使得激光输出功率、效率更高, 性能 更稳定. Yb³⁺ 掺杂 YAG, YLF, YVO₄ 等晶体可以用 来产生 1020 nm 左右的红外光, 倍频产生的 561 nm 的生物医疗激光在细胞分离中具有重大的应用.

在 Yb 激光中,由于 Yb 本身只有两个能级,更 接近准三能级理论模型,但相较于 Nd, Tm 等离子 的准三能级具有不同的特点,探索基于 Yb 离子 的准三能级激光模型对研究 Yb 激光具有重要意 义.鉴于此,本文从麦克斯韦速率分布函数出发, 建立基于 Yb 的准三能级理论模型,并将之应用于 端抽运 Yb:YVO₄ 激光中,探索 1020 nm 激光的阈 值特性.

2 理论模型和应用

首先我们需要先了解 Yb 离子的能级结构, 这 是建立模型的基础.由于基质晶体的不同, Yb 离子 上下两个能级的分裂情况也不同^[6,7], 但总的来说, Yb 离子能级分裂大概如图 1 所示.

如图所示, Yb 上下两个能级在晶体场中发生 分裂, 基态能级分裂成 4 个能级, 最下边用 0 表示 的是虚拟基态, 从该能级跃迁到² $F_{5/2}$ 的 0' 的吸收 峰位于 971 nm 处, $\lambda^2 F_{5/2}$ 的激发态 0' 跃迁到² $F_{7/2}$ 的态 2 发射峰波长位于 1020 nm 附近, 因而在研 究 1020 nm 激光实验中, 直接参与的能级为² $F_{5/2}$ 的 态 0, ${}^2F_{5/2}$ 的态 2, ${}^2F_{7/2}$ 的 0' 态, 同时, $\lambda^2 F_{7/2}$ 的 1' 吸收跃迁到激发态² $F_{5/2}$ 的态 1' 的波长也位于 971 nm, 因此, 用 971 nm 抽运源对晶体材料进行抽 运时, 基态粒子数将同时跃迁到激发态² $F_{5/2}$ 的态 0' 和 1'. 虽然只有两个能级, 但能级分裂较多, 考虑到 分裂只是影响部分粒子数反转, 所以这种复杂的跃

*福建省自然科学基金(批准号: 2012J05109),和福建省教育厅项目(批准号: JA12332, JB12192, JA12333, JK2012058)资助的课题.

[†]通讯作者. E-mail: ruopiao78@163.com

^{© 2013} 中国物理学会 Chinese Physical Society

迁结构更接近利用准三能级模型研究.

在大量关于准三能级模型的报道中,有些课题 组讨论纵向抽运条件激光输出的变化特性,有些则 研究基横模 TEM₀₀,还有研究能级交叉弛豫的影响 等.准三能级模型结构图如图 2 所示^[8].



图 1 Yb³⁺ 能级分裂图

抽运带



图 2 准三能级理论能级结构模型

图中, W 表示受激辐射概率, A 为自发辐射概率, S 为非辐射跃迁概率. 根据 Einstein 辐射理论、 速率方程和准三能级特点, 可以得到三个能级粒子 数变化关系为

$$\frac{\mathrm{d}n_3}{\mathrm{d}t} = n_1 W_{13} - n_3 (S_{32} + A_{31}), \tag{1}$$

$$\frac{\mathrm{d}n_2}{\mathrm{d}t} = n_3 S_{32} - (n_2 - n_1) W_{21} - n_2 (S_{21} + A_{21}), \quad (2)$$

$$n_1 + n_2 + n_3 = n_{\rm tot},\tag{3}$$

其中 n_{tot} 为总粒子数密度, $A_{21} = 1/\tau_{21}$ 为激光上能级的荧光寿命.

设
$$n_2 - n_1 = \Delta n = N$$
, 可得
 $n_1 = \frac{n_{\text{tot}} - N}{2}$, (4)

$$n_2 = \frac{n_{\rm tot} + N}{2},\tag{5}$$

代入方程(1)—(3)得到

$$\frac{\mathrm{d}N}{\mathrm{d}t} = (-2W_{21} - S_{21} - A_{21})N - n_{\mathrm{tot}}(S_{21} + A_{21}), \quad (6)$$

利用输出功率与能量的关系
$$P = \frac{dE}{dt}$$
,可以得到

$$P_{\text{out}} = \frac{dE}{dt} = \frac{hv_{21}V_{\text{R}}dN}{dt},$$

$$P_{\text{out}} = hv_{21}V_{\text{R}} [(-2W_{21} - S_{21} - A_{21})N$$
(7)

$$-n_{\rm tot}(S_{21}+A_{21})], \tag{8}$$

式中V_R为增益介质有效抽运体积.

设阈值功率为 P_{th} , 当阈值时, 由于 N 很小, dN/dt ~ 0, 在连续激光情况下, 抽运功率将保持 n_1,n_2,n_3 处于动态平衡, 考虑到抽运过程中各部分 损耗, 用 η_F 表示总效率, v_p 表示抽运波频率, 可以 得到阈值功率表达式为

$$\eta_{\rm F} P_{\rm th} = N_{\rm th} h v_{\rm p} V_{\rm R} A_{21}, \qquad (9)$$

利用粒子数反转浓度与发射截面和增益 gth 关系,得

$$N_{\rm th} = \Delta n_{\rm th} = g_{\rm th} / \sigma, \qquad (10)$$

$$P_{\rm th} = \frac{h v_{\rm p} V_{\rm R}}{\eta_{\rm F} \tau_{21}} \cdot \frac{g_{\rm th}}{\sigma},\tag{11}$$

对于阈值时增益方程 gth,我们利用谐振腔增益损 耗理论讨论,设谐振腔长度为 lc,增益介质长度为 l, 增益基质折射率为 n,引入有效腔长

$$l^* = l_{\rm c} + (n-1)l, \tag{12}$$

设入射光强为 I₀, 谐振腔镜的反射率为 R, 可以得到 光强公式

$$\ln \frac{I}{I_0} = \ln R + 2l^* g - 2l\sigma n_{\text{tot}}, \qquad (13)$$

这里,我们引入有效腔长 *l** 对增益介质中增益 gain (g)的特殊贡献概念,即 2*l**g,这是因为谐振腔对激 光产生而言不仅仅只有损耗,也有波长和模式竞争 选择作用,即正反馈作用,因此增益长度应该考虑 到整个有效腔长,而不是只有介质本身长度.介质 损耗部分却只有 2*l*σn_{tot},限于增益介质有效长度, 因为腔内气氛其他损耗比如空气分子对激光散射 等的损耗已经考虑进抽运效率 η_F 里.阈值时,

$$g_{\rm th} = \frac{2l\sigma n_{\rm tot} - \ln R}{2l^*},\tag{14}$$

代入方程(11),得到阈值功率表达式为

$$P_{\rm th} = \frac{h\nu_{\rm p}V_{\rm R}}{2\eta_{\rm F}\tau_{21}\sigma} \cdot \frac{1}{l^*} (2l\sigma n_{\rm tot} - \ln R).$$
(15)

114206-2

该阈值公式表示,对于三能级系统,考虑到 Yb 离子抽运能级虽为²F_{7/2} 的 0' 态,但 1',2' 态将全 部参与形成准三能级的抽运带,这种特殊结构使 得上能级粒子数密度 n_{2th} 变化复杂化,上能级单位 时间内损耗粒子数就不仅仅只是自发辐射 A₂₁ 引 起,还包括有效腔长带来的增益和总损耗之间竞争 的结果.

利用该模型模拟 Yb 激光实验,并将结果与传统两种理论进行比较,结果如图 3 所示.一种比较常用的是李适民等人编著的关于连续准三能级理论模型,该方程并未针对不同离子进行额外优化^[8],

$$P_{\rm th} = \frac{h v_{\rm p} n_{\rm tot} V_{\rm R}}{2 \eta_{\rm F} \tau}.$$
 (16)

另外一种是 Takunori 等人的准三能级理论模型的 研究结果^[9],得到阈值功率表达式如下所示:

$$P_{\rm th} = \frac{h v_{\rm p} (V_{\rm eff}/l_{\rm c}^*)}{2 \eta_{\rm p} \eta_{\rm a} \tau_{\rm f} f \sigma} (L_{\rm i} + T + 2N_1^0 \sigma l), \qquad (17)$$

这里, f 为配分函数, hv_p 为抽运光能量, V_{eff} 为有效 模式体积, 相当于 V_{R} . 这两种典型的准三能级模型 中, n_{tot} 对应于 N_1^0 , η_F 对应 $\eta_p\eta_a$, τ 对应 τ_f , 不同点 主要集中于 Takunori 等引用了能级布居数分配因 子, 精细化了能级结构模型. 同时 Takunori 等也引 入了有效腔长 V_{eff}/l_c^* , 只不过他们的有效腔长是为 了考察晶体和整个腔长的光程百分比.

实验中, Yb 掺杂浓度为约 13.8×10^{26} /m³, 输出镜透过率为 T = 5%, $\tau_{\rm f}$ 约为 951 µs, σ 为 3.3×10^{-20} cm², 抽运波长为 913 nm, 发射波长为 1030 nm, 所用的抽运源为 Ti 宝石激光器, 该抽运 源汇聚于晶体中的光束半径为 28 µm, 聚焦长度 为约 1.1 nm, 实验中的阈值功率约为 60 mW^[9], 从 三种模型可以看出, 李氏模型为 580 mW, 而根据 Takunori 等的模型, 布居数分配函数 $f = f_1 + f_2$, 分 别表示下能级和上能级的粒子数分布情况, 可以想 象, 如果只有两个能级, 粒子数反转时, 刚好达到阈 值条件, 此时分配函数通常位于 0.5, 他们实验中取 $f \sim 0.7$, 此时阈值为约 170 mW, 而我们的模型下阈 值为 110 mW, 更接近实验值.

为了验证其普适性,我们还将该模型应用于 Yb:YVO4 晶体并比较了这三种模型的结果,如图 4 所示.



图 3 Ti 宝石激光抽运 Yb:YAG 实验中阈值随浓度变化关系 (模型 2 的 f = 0.7)



图 4 Ti 宝石激光抽运 Yb: YVO₄ 实验中阈值随浓度变化关系 (模型 2 的 f = 0.7)

实验中, Yb 掺杂浓度为 1.62 at%约 2.2× 10^{26} /m³,输出镜透过率为T = 4%, $\tau_{\rm f}$ 约为 250 µs, σ 为 0.8×10⁻²⁰ cm², 抽运波长为 985 nm, 发射波长 为 1020 nm, 所用的抽运源为 Ti 宝石激光器, 该抽 运源汇聚于晶体中的光束直径为 110 µm, 聚焦长 度为约 2.5 nm, 实验阈值为 840 mW^[10]. 从图中可 以看出, 李氏模型阈值约为 3 W, 而 Takunori 等的模 型下在 f = 0.7 时阈值为 1 W. 在我们模型条件下, 阈值为 0.8 W, 与 Kisel 等报道的 840 mW 接近 ^[10]. 从以上比较可以看出, 引入有效腔长概念时理论与 实验更接近, 将有效腔长用于增益的贡献比将之用 于纯粹的晶体和腔长的百分比更切合实际.

由于常用 LD 抽运源比 Ti 宝石激光器便宜, 易 于商业化和推广, 因此我们将该模型用于 LD 端 抽运 Yb: YVO4 实验, 考察 LD 抽运情况下激光阈 值特性. 拟用的实验参数为:最大功率 30 W 的 LD 971 nm 激光源, 数值孔径 0.22, 中心孔径为 400 μm, Yb: YVO4 晶体尺寸为 3 mm × 3 mm × 2 mm, Yb 浓 度为 5 at%, 全反镜的膜系为 M₁ 对 970—975 nm 高 透 (HT) 95%对 1010—1020 nm 高反 (HR) 99.95%; 输出镜 M₂ 对 1020 nm 反射率为 99.95%, 对 1010— 1020 nm 透过率为 T = 1%—10%. 整个实验均在 腔内进行. Yb 掺杂浓度为 6×10^{26} /m³, 输出镜透 过率为 T = 5%, $\tau_{\rm f}$ 约为 1.1 ms^[11], 发射截面 σ 为 0.6 × 10⁻²⁰ cm², 抽运波长为 971 nm, 发射波长为 1016 nm, 得到阈值功率在不同浓度、不同有效晶 体厚度 L 和不同透过率 T 情况下的阈值特性, 如图 5 所示.



图 5 LD 端抽运 Yb: YVO₄ 实验中阈值随浓度、透过率、腔 长变化关系

从图中可以看出,在5 at%Yb 掺杂情况下,阈

- [1] Stefan Bjurshagen, Ralf Koch 2004 Applied Optics 43 4753
- [2] Zhou Y, Yao S N, Liu J, Chen J B, Chen S F, Xin J G 2013 Acta Phys. Sin. 62 024210 (in Chinese) [周英, 姚淑娜, 刘军, 陈家斌, 陈淑芬, 辛 建国 2013 物理学报 62 024210]
- [3] Beach R J 1995 Optics Communications 123 385
- [4] Brenier A, Boulon G 2001 Journal of Alloys and Compounds 323 210
- [5] Gao J Y, Zhang Q L, Sun D L, Liu W B, Yang H J, Wang X F, Yin S T 2013 Acta Phys. Sin. 62 013102 (in Chinese) [高进云, 张庆礼, 孙敦 陆, 刘文鹏, 杨华军, 王小飞, 殷绍唐 2013 物理学报 62 013102]
- [6] Fan T Y, Byer R L 1987 IEEE J. Quantum Electron QE-23 605
- [7] Risk W P 1988 J. Opt. Soc. Am. B 5 1412

值最低为 1.1 W, 对应有效晶体长度 L=1 mm, 对发 射波长 1016 nm 透过率 T=1%; 最大为 3.9 W, 对 应有效晶体长度 L=2 mm, 对发射波长 1016 nm 透 过率 T=10% 时. 低透过率, 低掺杂浓度, 较短的有 效晶体长度都可以降低阈值, 尤其是有效晶体长度, 可以显著降低阈值特性, 因而设计合理、合适、精 简的谐振腔结构以及聚焦光学系统对改善激光阈 值很有意义.

3 结论

本文对二能级结构的 Yb³⁺ 离子激活的激光模 型进行了研究,建立了适用于 Yb³⁺ 离子的准三能 级理论模型.引入有效腔长对激光增益的贡献因 子 $2l^*g$ 和介质损耗因子 $2l\sigma n_{tot}$ 描述光强,发现有 效腔长对增益的贡献因子可以影响 Yb 离子能级的 粒子数反转效率,进而影响激光阈值特性.将基于 该点得出的阈值理论与 Ti 宝石抽运 Yb 掺杂 YAG, YVO₄ 晶体的实验结果相比较,理论和实验符合良 好.在 971 nm LD 抽运,有效晶体长度 L = 1 mm,输 出镜透过率为 1%条件下,获得激光阈值为 1.1 W. 有效晶体长度 L = 2 mm,输出镜透过率为 10% 时, 得到阈值为 3.9 W.

- [8] Li S M, Huang W L 2005 Laser devices principle and designs (Beijing: National defence industry press) p150–160 (in Chinese) [李适民, 黄维 玲 2005 激光器件原理与设计(北京:国防工业出版社)第150—160 页]
- [9] Takunori T, Tulloch W M, Byer R L 1997 Applied Optics 36 1867
- [10] Kisel V E, Troshin A E, Tolstik N A, Shcherbitsky V G, Kuleshov N V, Matrosov V N, Matrosova T A, Kupchenko M I 2004 *Optics Letters* 29 2491
- [11] Lan J M, Chen J Z, Guo F Y, Gao S K, Hu X L, Zhuang N F 2003 Journal of Synthetic Crystals 32 449

The modeling of end pumping Yb³⁺:YVO₄ quasi-three-level laser*

Xia Zhong-Chao Yang Fu-Gui[†] Qiao Liang

(*Fujian Jiangxia University, Fuzhou* 350108, *China*) (Received 10 December 2012; revised manuscript received 25 February 2013)

Abstract

In a Yb³⁺ laser, the two-energy level structure is close to the quasi-three-level model, but different from that for the Nd and Tm lasers, so it is necessary to investigate the quasi-three-level modeling that will be applied to the Yb³⁺ laser. Based on the energy level structure, cavity gain and loss as well as population distribution, we present the modeling. Introducing an effective cavity length factor, the laser intensity is calculated and the threshold is obtained. Comparison with the experiments, indicates that the effective cavity length ratio changes the fractional population function and loss, which would influence the threshold and output in turn. Applied to investigate the laser property in the process of end pumping Yb³⁺:YVO₄ laser, we get the threshold being 1.1 W, corresponding to the L = 1 mm and T = 1%; whereas the threshold is 3.9 W, corresponding to the L = 2 mm and T = 10%.

Keywords: Yb³⁺:YVO₄, quasi-three-level, effective cavity length factor

PACS: 42.55.Xi, 32.30.Jc, 65.40.De

DOI: 10.7498/aps.62.114206

^{*} Project supported by the Fujian Natural Science Foundation, China (Grant No. 2012J05109), and the Fujian Education Department Projects, China (Grant Nos. JA12332, JB12192, JA12333, JK2012058).

[†] Corresponding author. E-mail: ruopiao78@163.com